

REC'D PCT/PTC 27 DEC 2004

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

PCT/EP03/06587

19.-8.-03



REC'D 08 SEP 2003

WIPO PCT

PRIORITY  
DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 102 28 123.8

Anmeldetag: 24. Juni 2002

Anmelder/Inhaber: Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., München/DE

Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtungen zur Erfassung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen

IPC: G 12 B 21/06

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 4. Juli 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident  
Im Auftrag

Faust

15717 Hz/hr

## **Verfahren und Vorrichtungen zur Erfassung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen**

Die Erfindung betrifft Verfahren zur Erfassung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 sowie Vorrichtungen zur Durchführung und Anwendungen derartiger Verfahren.

Das räumliche Auflösungsvermögen konventioneller optischer Verfahren, z. B. in der Mikroskopie oder bei der Datenspeicherung ist beugungsbedingt auf ungefähr die halbe Wellenlänge der jeweils verwendeten optischen Strahlung begrenzt. Zur Erhöhung des Auflösungsvermögens bemüht man sich daher, möglichst kurzwelliges Licht zu verwenden. Beispielsweise wurde mit der Verfügbarkeit geeigneter blauer Lichtquellen eine erhebliche Auflösungsverbesserung und damit eine erhöhte Speicherdichte erreicht. Wenn für das Schreiben und Lesen der Daten im Wesentlichen die gleiche Wellenlänge verwendet wird, wird die Beugungsbegrenzung als prinzipielle Beschränkung akzeptiert. Ein Problem tritt jedoch auf, wenn Daten mit extrem kurzwelliger Strahlung, wie z. B. mit Ionenstrahlen geschrieben werden (siehe S. Kalbitzer in „Applied Physics A“, Bd. 71, 2000, Seite 565-569). Fokussierte Ionenstrahlen ermöglichen eine Speicherdichte bis in den Bereich von Tbit/cm<sup>2</sup>. Allerdings sind Daten mit einer derartigen Speicherdichte mittels konventioneller optischer Methoden wegen der Beugungsbegrenzung nicht lesbar.

Die Beugungsbegrenzung kann durch die Anwendung nahfeldoptischer Methoden überwunden werden. Diese wurden zunächst für die Nahfeldmikroskopie (SNOM) entwickelt, bei der Oberflächeneigenschaften einer Probe mit Ortsauflösungen unterhalb von 10 nm durch Beobachtung der Nahfeldwechselwirkung einer Sonde mit der Probe erfasst werden (siehe z. B. R. Hillenbrand und F. Keil-

mann in „Applied Physics Letters“, Bd. 80, 2002, Seite 25-27, und in „Physical Review Letters“, Bd. 85, 2000, Seite 3029-3032). Die hohe Auflösung im nm-Bereich wird durch das Prinzip der aperturlosen Tastspitze erzielt (siehe z. B. US 4 947 034). Die optische Nahfeldmikroskopie besitzt zwar den Vorteil einer verbesserten Ortsauflösung, dieser erfordert jedoch bisher einen erheblichen messtechnischen Aufwand. Aus dem Streulicht, das von der Sonde in die Umgebung gestrahlten wird, muss der Nahfeldanteil herausgefiltert werden. Der Nahfeldanteil ist der Teil des Streulichts, der durch die Nahfeldwechselwirkung zwischen der Sonde und der Probe bestimmt wird und der empfindlich von Oberflächeneigenschaften der Probe abhängig ist. Der Nahfeldanteil wird zunächst vom übrigen Streulicht überstrahlt und hat nach Herausfilterung ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR).

Die Anwendung optischer Nahfeldmethoden beim Auslesen von optischen Datenspeichern wird bspw. von Y. Martin et al. in „Applied Physics Letters“, Bd. 71, 1997, Seite 1-3, und in US 5 602 820 beschrieben. Das Auslesen der Daten erfolgt analog zum Betrieb eines optischen Nahfeldmikroskops, nämlich durch Erfassung der Nahfeldwechselwirkung zwischen einer Sonde (SNOM-Spitze) und der Oberfläche eines Datenträgers. Von Y. Martin et al. konnten zwar Daten mit Speicherdichten bis zu Tbits/cm<sup>2</sup> ausgelesen werden. Es treten jedoch die gleichen Probleme auf wie bei der optischen Nahfeldmikroskopie. Das Auslesen eines Bits entspricht dem Messen der lokalen Oberflächeneigenschaft des Datenträgers. Für eine zuverlässige Messung benötigt man bisher wegen des schlechten SNR eine relativ lange Messzeit. Für praktische Zwecke ist das nahfeldoptische Lesen von Daten bisher nicht geeignet.

Es besteht ein Interesse an nahfeldoptischen Methoden, mit denen die Beschränkungen herkömmlicher Techniken überwunden wer-

den und die sich insbesondere durch ein verbessertes SNR auszeichnen.

Von B. Knoll und F. Keilmann wurde die optische Nahfeldmikroskopie zur Erfassung spezieller Probeneigenschaften auf den infraroten Spektralbereich ausgedehnt. Es wurde z. B. festgestellt, dass die infrarote Nahfeldwechselwirkung von der Leitfähigkeit einer untersuchten Siliziumprobe abhängig ist (siehe B. Knoll et al. in „Applied Physics Letters“, Bd. 77, Seite 3980-3982). Die infrarote Nahfeldmikroskopie ermöglicht damit, die Eigenschaften von Ladungsträgern in Silizium mit hoher Ortsauflösung (30 nm) zu erfassen. Des Weiteren konnten chemische Verbindungen auf Oberflächen durch infrarote Nahfeldmikroskopie mit einer Ortsauflösung von ungefähr 100 nm erfasst werden (siehe B. Knoll et al. in „Nature“, Bd. 399, 1999, Seite 134-136). Diese Untersuchungen an speziellen Messobjekten lieferten jedoch noch keine Lösung für das o. g. Problem, bei einer Sonden-Proben-Wechselwirkung Nahfeldanteile aus dem Streulicht mit einer erhöhten Effektivität zu erfassen.

Eine theoretische Beschreibung von Wechselwirkungseffekten zwischen einem kugelförmigen Objekt und einer Oberfläche findet sich in der Publikation von P. K. Aravind et al. in „Surface Science“, Bd. 124, 1983, Seite 506-528. Diese Beschreibung ist auf die Illustration einer Feldverstärkung zwischen dem Objekt und der Oberfläche beschränkt. Es wird gezeigt, dass resonant verstärkte Wechselfelder auftreten, wobei die Resonanzverstärkung insbesondere durch Plasmonen oder durch Phononen verursacht wird. P. K. Aravind et al. geben keine Hinweise auf eine Lichtabstrahlung des betrachteten Systems oder auf Wechselwirkungen zwischen mehreren Objekten. Des Weiteren sind keine in der Praxis realisierten Anwendungen der Feldverstärkung beschrieben.

Schließlich ist als weit verbreitetes Werkzeug in der physikalischen und chemischen Analytik die Infrarot-Reflexionspektroskopie bekannt. Im infraroten Spektralbereich können beispielsweise stoffspezifisch Molekülbindungen nachgewiesen werden. Ein Nachteil der herkömmlichen Reflexionsspektroskopie an polaren Materialien mit einer Dielektrizitätskonstante  $< 0$  besteht darin, dass die spektroskopisch detektierbaren Wechselwirkungen relativ breitbandig sind. Wenn eine Probe aus mehreren Komponenten besteht und diese sich spektral unterscheiden, ist wegen der Breitbandigkeit der Wechselwirkungen nicht sichergestellt, dass mit der herkömmlichen Infrarot- Reflexionspektroskopie der spektrale Unterschied und damit jede der Komponenten detektierbar ist.

Eine Aufgabe der Erfindung ist es, verbesserte Verfahren zur Erfassung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen im infraroten Spektralbereich und Vorrichtungen zur Durchführung der Verfahren bereitzustellen, mit denen die Nachteile der herkömmlichen Techniken überwunden werden. Eine Aufgabe der Erfindung ist es insbesondere, Nahfeldmessungen mit einem erhöhten Signal-Rausch-Verhältnis und Infrarotmessungen mit erhöhter spektraler Selektivität durchzuführen. Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht in der Bereitstellung neuer Anwendungen von Nahfeldwechselwirkungssignalen im infraroten Spektralbereich.

Diese Aufgaben werden mit Verfahren und Vorrichtungen mit den Merkmalen gemäß den Patentansprüchen 1, 20 oder 26 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Eine Grundidee der Erfindung ist es, optische Nahfeldwechselwirkungssignale im infraroten Spektralbereich zu erfassen und/oder zu verarbeiten, indem mindestens eine Objekt-Kombination aus mindestens zwei Objekten mit Infrarotstrahlung beleuchtet wird, so dass zwischen den Objekten eine Infrarot-

Nahfeldkopplung erzeugt wird, und das von der Objekt-Kombination gestreute Streulicht erfasst wird, das einen Anteil enthält, der durch die Nahfeldkopplung modifiziert ist. Erfindungsgemäß umfasst mindestens eines der Objekte ein polares Material, das zumindest teilweise eine polare Festkörperstruktur besitzt. Vorteilhafterweise wird bei der Beleuchtung der Objekt-Kombination mindestens eine Phononpolaritonresonanz angeregt, mit der der modifizierte Anteil im Streulicht verstärkt wird.

Erfindungsgemäß erfasste und/oder bearbeitete optische Nahfeldwechselwirkungssignale werden allgemein durch elektromagnetische oder elektrische Felder gebildet, die durch die Nahfeldwechselwirkung zwischen den Objekten modifiziert sind. Unter Erfassung wird allgemein eine Detektion (oder Messung) mit einer Detektoreinrichtung oder ein Empfangen (oder resonantes Ankoppeln) mit einem benachbarten Objekt, das wie eine Antenne wirkt, verstanden. Eine Verarbeitung der optischen Nahfeldwechselwirkungssignale umfasst eine Auswertung, Demodulation und/oder Filterung der Signale der Detektoreinrichtung oder eine Weiterleitung resonanter Anregungen an benachbarte Objekte. Entsprechend ist eine erste Ausführungsform der Erfindung auf Detektions- und Messanwendungen der erfundungsgemäßen Verstärkung infraroter Nahfeldkopplung gerichtet, während eine zweite Ausführungsform Anwendungen bei optischen Modulatoren, insbesondere in optischen Schaltkreisen umfasst.

Entsprechend der ersten Ausführungsform der Erfindung wird vorgeschlagen, eine Streulichtmessung im infraroten Spektralbereich an einer Objekt-Kombination (Probe-Sonde-Kombination) dagehend weiterzuentwickeln, dass als Probe und/oder als Sonde ein Material verwendet wird, das zumindest teilweise eine polare Festkörperstruktur besitzt und in dem bei infraroter Beleuchtung eine rezonante Kopplung von Phononen mit dem optischen Feld angeregt wird, die als verstärkter Nahfeldanteil im

Streulicht detektierbar ist. Es wird mindestens eine Phononresonanz angeregt, die zu einer Verstärkung mindestens eines Nahfeldanteils im Streulicht führt, so dass die nahfeldoptische Messung mit einem erheblich verbesserten Signal-Rausch-Verhältnis durchgeführt wird. Lokale Änderungen des Brechungsindex an der Probe führen zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz und sind damit effektiv detektierbar. Vorteilhaftweise ist die Nahfeldresonanz empfindlich von der Nahfeldwechselwirkung mit der unmittelbaren Umgebung abhängig und eignet sich daher hervorragend als lokaler Sensor mit extrem hoher Ortsauflösung. Des Weiteren besitzt die infrarot-optische Anregung von Phononpolaritonen in einem polaren Material den Vorteil, dass eine extrem schmalbandige Infrarot-Nahfeldresonanz auftritt. Erstmalig werden bspw. bei der Infrarot-Reflektionsspektroskopie selbst spektral nahe beieinander liegende Infrarotbanden getrennt detektierbar.

Als Kombination aus einer Probe und einer Sonde wird hier allgemein ein System aus zwei Objekten bezeichnet, die mit geringem Abstand angeordnet sind (z. B. bis 100 nm) oder sich gegenseitig berühren (oder ineinander eingebettet sind). Bei Infrarotbestrahlung erfolgt in mindestens einem der Objekte eine resonante Anregung von Phononpolaritonen. Allgemein wird im Folgenden das Objekt, dessen Eigenschaften durch die erfindungsähnliche Streulichtmessung erfasst werden sollen, als Probe bezeichnet, während das jeweils andere Objekt, in dem bei Infrarotbestrahlung Phononpolaritonen resonant angeregt werden oder durch das bei Infrarotbestrahlung in der Probe lokal Phononpolaritonen angeregt werden, als Sonde bezeichnet wird. Gemäß bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung umfasst die Probe eine Festkörperoberfläche, ein auf einer Festkörperoberfläche gebildetes Adsorbat oder ein festes, flüssiges oder gasförmiges Volumenmaterial. Die Festkörperoberfläche kann eben oder gekrümmt sein. Die Sonde umfasst bspw. eine Tastspitze, wie sie von der Nahfeldmikroskopie bekannt ist, eine stabförmige Son-

denspitze, die bspw. als Lesekopf beim Auslesen gespeicherter Daten verwendet werden kann, oder eines oder mehrere Partikel, die eingebettet oder frei suspendiert in einem festen, flüssigen oder gasförmigen Medium oder adsorbiert auf einer Trägerfläche angeordnet sind.

Mindestens eines der Objekte besteht zumindest teilweise an seiner während der Messung zum jeweils anderen Objekt gewandten Seite aus mindestens einem kondensierten Material mit polarer Festkörperstruktur. Ein solches Material zeichnet sich durch eine polare Verbindung zwischen den atomaren Bausteinen des Festkörpers aus. Eine solche Verbindung besitzt einen polaren Charakter, wenn die Bindung durch eine asymmetrische Ladungsverteilung charakterisiert ist. Dies ist insbesondere bei einer Ionenbindung oder einer Bindung mit Dipolmoment oder einer polarisierten kovalenten Bindung oder einer Bindung mit ionischem Anteil der Fall. Das eine Objekt besitzt zumindest teilweise die polare Festkörperstruktur. Dies bedeutet, dass das Objekt aus mehreren Teilen besteht, von denen ein Teil die polare Festkörperstruktur besitzt (z. B. die Sondenspitze einer Tastsonde) und/oder dass die polare Festkörperstruktur nur in Teilen des jeweiligen Objektmaterials gebildet ist. So kann das Material mit polarer Festkörperstruktur ein Ionenkristall oder ein amorphes Material mit einer Nahordnung umfassen. Beim amorphen Material sind die erfindungsgemäß resonant angeregten Gitterschwingungen lokale Schwingungen. Allgemein ist ein Material als Probe und/oder Sonde geeignet, wenn der Realteil der Dielektrizitätskonstante in einem Frequenzbereich seiner Dispersionskurve kleiner als 0 wird. Dies ist insbesondere auch bei amorphen Materialien, wie z. B.  $\text{SiO}_2$  (Glas) der Fall.

Besondere Vorteile ergeben sich, wenn die Probe und/oder die Sonde zumindest teilweise aus Siliziumkarbid (SiC) besteht. Siliziumkarbid besitzt den Vorteil einer hohen und stark lokalisierten optischen Nahfeldkopplung. Des Weiteren besitzt SiC ei-

ne hervorragende mechanische, thermische und chemische Stabilität, so dass sich breite Anwendungen in der Mikroskopie, in der optischen Datenspeichertechnik und der Sensortechnik ergeben. SiC ist ein Material, mit dem extrem hohe Speicherdichten ( $T\text{bit}/\text{cm}^2$ ) erwartet werden und das sich wegen seiner physikalischen und chemischen Stabilität durch eine große Datensicherheit auszeichnet. Das erfindungsgemäße Verfahren wird in der optischen Datenspeichertechnik vorzugsweise mit einer Sonde aus SiC umgesetzt, da diese extrem haltbar ist und hohe Signale liefert, was sich insbesondere für die räumlich hochauflösende (Sub-10 nm-Bereich), infraroptische Mikroskopie auswirkt.

Vorteilhafterweise kann der durch die Nahfeldkopplung modifizierte Anteil des gemessenen Streulichts einer Spektralanalyse unterzogen werden. Es können mit hoher Selektivität mehrere Phononresonanzen entsprechend mehreren Komponenten oder Phasen in der Probe erfasst werden.

Gegenstände der Erfindung sind auch Probe-Sonde-Kombinationen und Messanordnungen zur Streulichtmessung im infraroten Spektralbereich, die zur Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß der oben genannten ersten Ausführungsform eingerichtet sind. Erfindungsgemäße Messanordnungen zeichnen sich insbesondere durch eine Messsonde aus, die zumindest teilweise aus einem Material mit einer polaren Festkörperstruktur besteht.

Eine erfindungsgemäße Messanordnung kann z. B. wie eine Vorrichtung zur aperturlosen Nahfeldmikroskopie aufgebaut sein, wie sie aus DE 100 35 134 bekannt ist, die hiermit vollständig in Bezug auf die dort beschriebene interferometrische Nahfeldmikroskopie und die hierfür vorgesehene Vorrichtung in die vorliegende Patentanmeldung einbezogen wird. Je nach Stärke der erfindungsgemäß erzeugten Resonanzerhöhung kann der durch die Nahfeldwechselwirkung modifizierte Anteil auch direkt durch op-

tische Detektoren ggf. in Kombination mit Filtern erfasst werden.

Die Erfindung besitzt den besonderen Vorteil, dass wenigstens ein Teil des bestrahlten Probe-Sonde-Systems zu einer Resonanz bei Infrarotbestrahlung beiträgt, so dass ein erhöhter Nahfeldanteil gestreut wird. Oberflächenmerkmale werden mit einem erhöhten Kontrast detektierbar. Lokale Messungen können wegen des verbesserten SNR mit einer verkürzten Messzeit durchgeführt werden. Dieses Merkmal ist insbesondere für das Auslesen von Daten mit extremen Speicherdichten unter praktischen Bedingungen von Bedeutung.

Gemäß der oben genannten zweiten Ausführungsform der Erfindung bedeutet die Erfassung des modifizierten Anteils des Streulichts eine resonante Anregung mindestens eines zu der Objekt-Kombination benachbarten Objektes. Die erfindungsgemäß durch die Infrarotbestrahlung resonant angeregten Phononpolaritonen bewirken die Erzeugung von Phononpolaritonen in mindestens einem benachbarten Objekt, wobei eine entsprechende rezonante Feldverstärkung auftritt. Der rezonante Anregungszustand kann entlang mindestens einer Reihe von Objekten weitergeleitet werden. Während der Weiterleitung können durch gezielte Beeinflussung einzelner Objekte oder von deren Umgebung weitergeleitete Nahfeldwechselwirkungssignale moduliert werden. Die mindestens eine Reihe von Objekten kann Verzweigungen aufweisen oder ein Netzwerk bilden. Die Objekte umfassen bspw. Partikel mit typischen Größen im Bereich von 1 nm bis 100 µm, die mit typischen Abständen im Bereich von 1 nm bis 10 µm auf einem Substrat angeordnet sind.

Erfindungsgemäß kann vorgesehen sein, dass bspw. durch elektromagnetische, elektrische oder magnetische Felder die physikalischen Eigenschaften eines oder mehrerer der Objekte oder von deren Umgebung moduliert werden. Die Modulation umfasst bspw.

eine vorbestimmte Änderung der Kristallstruktur, der Bandstruktur, der Ladungsträgerdichte oder dgl.. Durch die Modulation wird entsprechend die Weiterleitung der Nahfeldwechselwirkungs- signale moduliert. Im Unterschied zu herkömmlichen optischen Schalttechniken besitzt die erfindungsgemäße Verarbeitung optischer Nahfeldwechselwirkungssignale den besonderen Vorteil, dass die angeregten Phononresonanzen spektral extrem scharfbandig sind. Dadurch können Schaltzustände (z. B. Ein/Aus) mit größerer Zuverlässigkeit eingestellt bzw. übertragen wird.

Eine Vorrichtung zur Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß der oben genannten zweiten Ausführungsform ist vorzugsweise ein optischer Modulator zur Erfassung oder Verarbeitung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen im infraroten Spektralbereich. Der Modulator wird gemäß einer bevorzugten Ausführungsform durch ein festes Substrat gebildet, auf dem eine Vielzahl von partikelförmigen Objekten angeordnet sind, von denen zumindest ein Teil mit externen Feldern modulierbar sind. Der optische Modulator ist vorzugsweise mit mindestens einer Beleuchtungseinrichtung und/oder mindestens einer Detektoreinrichtung ausgestattet, die ebenfalls auf dem Substrat angebracht sind. Gegenstand der Erfindung ist entsprechend auch ein optischer Schaltkreis zur nahfeldoptischen Verarbeitung von Signalen.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung der beigefügten Zeichnungen ersichtlich. Es zeigen:

Fig. 1: schematische Illustrationen verschiedener Proben und Sonden zur Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 2: eine schematische Übersichtsdarstellung einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Messanordnung,

Fig. 3: eine Kurvendarstellung zur Illustration der erfindungsgemäß angeregten Phononresonanz,

Fig. 4: Kurvendarstellungen zur Illustration der Wellenlängenselektivität der erfindungsgemäß angeregten Phononresonanz,

Fig. 5: Beispiele erfindungsgemäß gewonnener nahfeldmikroskopischer Bilder,

Fig. 6: Kurvendarstellungen zur Illustration der phononenverstärkten Nahfeldkopplung an SiC, und

Fig. 7, 8: schematische Illustrationen von Ausführungsformen erfindungsgemäßer optischer Modulatoren.

Die Erfindung wird im Folgenden beispielhaft unter Bezug auf die Verwendung von SiC als polares Material für die phononenengekoppelte Nahfeldverstärkung beschrieben. Die Umsetzung der Erfindung ist jedoch nicht auf dieses Material beschränkt. Vielmehr können auch andere polare Dielektrika, insbesondere III-V-, IV-IV- und II-VI-Halbleiter, Mineralien, wie z. B. Calcit oder Glas, oder Ferroelektrika verwendet werden. Für diese Materialklassen stehen angepasste Laser-Lichtquellen mit geeigneten Infrarotemissionen (insbesondere Quantenkaskadenlaser) zur Verfügung.

#### Theoretische Grundlagen

Optische Nahfelder treten in der Nähe jedes beleuchteten Objektes auf. Sie werden durch die Wechselwirkung der beleuchteten Materie mit dem einfallenden elektromagnetischen Feld erzeugt und fallen innerhalb typischer Abstände von rd. 10 bis 100 nm stark ab. Erfindungsgemäß werden die optischen Nahfelder durch

Kopplung mit Gitterschwingungen (Phonenen) in polaren Dielektrika (wie z. B. SiC) verstärkt (Nahfeldkopplung). Die Verstärkung tritt bei materialabhängigen, durch die Phononen bestimmten Frequenzen als scharfe Resonanz auf (Nahfeldresonanz). Überraschenderweise hat sich herausgestellt, dass die Nahfeldresonanz schärfster und stärker als die bei Metallen bekannte Plasmonenresonanz ist (siehe unten). Eine elementare Schwingungsanregung eines polaren Festkörpers wird auch als Phonon-Polariton bezeichnet, das als Quasiteilchen sowohl mechanische als auch elektromagnetische Eigenschaften besitzt. Die Anregung des Polaritons liefert die Nahfeldresonanz, die im Folgenden beschrieben wird.

Es wird ein kleiner Partikel aus einem polaren Material mit der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_p$  (Durchmesser z. B.  $a = 10 \text{ nm}$ ) betrachtet, auf dessen Oberfläche Infrarotstrahlung fällt. Die Feldstärke der einfallenden Strahlung wird mit  $E_{in}$  bezeichnet. Das Verhältnis des an der Oberfläche des Partikels verstärkten optischen Feldes  $E_{loc}$  zum einfallenden Feld  $E_{in}$  ( $E_{loc}/E_{in}$ ) wird durch die Polarisierbarkeit  $\alpha$  des Partikels bestimmt. Die Polarisierbarkeit  $\alpha$  berechnet sich gemäß

$$\alpha = 4\pi a^3 (\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_p + 2\epsilon_m) \quad (1)$$

In Gleichung 1 ist  $a$  der Durchmesser des Partikels und  $\epsilon_m$  die Dielektrizitätskonstante des umgebenden Mediums. Die Nahfeldverstärkung  $E_{loc}/E_{in}$  ist proportional zu  $\alpha$ , so dass ein Resonanzmaximum bei einer Frequenz gegeben ist, bei der gilt:

$$\operatorname{Re}(\epsilon_p(\omega)) = -2\epsilon_m \quad (2)$$

Die Berechnung mit Dielektrizitätsdaten von Metallen und z. B. SiC ergibt die in Figur 3 gezeigten Kurven. Die Plasmonresonanzen kleiner Metallpartikel z. B. aus Gold oder Silber treten im sichtbaren Wellenlängenbereich mit relativ niedrigen Amplituden

auf. Die Phononresonanz polarer, dielektrischer Partikel hingen ist wesentlich stärker und schärfer (bei diesem Vergleich wurden gleiche Partikelgrößen angenommen).

Neben dieser Erkenntnis ist ferner von Bedeutung, dass die Resonanz gemäß Gleichung (1) empfindlich von der Dielektrizitätskonstante der unmittelbaren Umgebung des Partikels abhängig ist. Damit kann ein Partikel (oder ein polarer Materialabschnitt in einem Objekt) als lokaler Sensor für Materialeigenschaften in der Umgebung verwendet werden. Verschiedene Anwendungen in der Mess-, Datenspeicher- und Sensortechnik werden unten beispielhaft genannt.

Erfnungsgemäß wird die Phononverstärkung der Nahfeldkopplung zwischen zwei Objekten, die hier allgemein als Probe und Sonde bezeichnet werden, ausgenutzt, um mit hoher Ortsauflösung Eigenschaften der Probe zu erfassen. Bevorzugt werden Probesonde-Kombinationen verwendet, wie sie bei der herkömmlichen optischen Nahfeldmikroskopie mit einer aperturlosen optischen Tastspitze und einer ebenen Probe gegeben sind. Das Ende der Tastspitze besitzt bspw. die Gestalt eines kleinen Partikels (kleine Kugel) mit dem Radius  $a$ , die sich mit einem Abstand  $z$  von der Probenoberfläche befindet. Je nach Anwendung kann das Probenmaterial an seiner Oberfläche zumindest teilweise ein polares Dielektrikum aufweisen und das Sondenmaterial nicht-polar sein. Die Verhältnisse können alternativ umgekehrt sein.

In Fig. 4 sind die messbaren Signale bei der erfundungsgemäßen Nahfeldkopplung zwischen Probe und Sonde (Teilbild a) und bei einer herkömmlichen Reflektionsmessung (Teilbild b) im Vergleich dargestellt. Die Probe 2 besteht aus SiC mit einer ebenen Oberfläche, die von der Sonde 2 in Form eines Pt-Partikels mit einem Radius  $a \ll \lambda$  berührt wird.

Bei Beleuchtung der Sonde 2 wird in der Probe 1 ein Bilddipol induziert, dessen Polarisierbarkeit  $\alpha\beta$  beträgt, wobei

$$\beta = (\epsilon_s - 1)/(\epsilon_s + 1) \quad (3)$$

gilt ( $\epsilon_s$  ist die Dielektrizitätskonstante der Probe 1). Die Nahfeldkopplung des Sondendipols und des Bilddipols (in der Probe 1) ergibt eine effektive Polarisierbarkeit, die in elektrostatischer Näherung beträgt:

$$\alpha_{\text{eff}} = [\alpha(1 + \beta)] / [1 - \alpha\beta/16\pi(a + z)^3] \quad (4)$$

Das gekoppelte System kann somit durch den Einfluss entweder der Probe 1 oder der Sonde 2 oder von beiden resonant werden. Die mit Abstand von der Probe-Sonde-Kombination, d. h. im Fernfeld messbare Streulichtintensität  $S$  hängt von  $\alpha_{\text{eff}}$  ab gemäß:

$$S \approx |\alpha_{\text{eff}}|^2 \quad (5)$$

Der in Fig. 4a gezeigte, simulierte Kurvenverlauf zeigt das Verhältnis  $S_{\text{SiC}}/S_{\text{Au}}$  der Streulichtintensitäten, die an einer SiC- und einer Au-Probe ermittelt werden. Es ergibt sich eine extrem scharfe Resonanz bei einer Frequenz von  $929 \text{ cm}^{-1}$ . Das Streulicht bei der Wechselwirkung mit SiC übersteigt den entsprechenden Wert bei Wechselwirkung mit Au um ungefähr zwei Größenordnungen. Diese Verstärkung stellt einen wichtigen Vorteil der Erfindung dar. Figur 4b zeigt die im Fernfeld messbare Reflexion, die für Au einen Wert von nahezu 1 und für SiC den an sich bekannten Verlauf mit einem Maximum von  $790 \text{ cm}^{-1}$  und  $950 \text{ cm}^{-1}$  zeigt. Dieses Ergebnis illustriert, dass die Nahfeldkopplung zusätzlich zu der hohen lokalen Selektivität vorteilhafterweise auch durch eine spektrale Einengung gekennzeichnet ist. Diese kann die Unterscheidbarkeit von Probenmaterialien (z.B. stoffliche Phasen) radikal verbessern.

Die Figuren 5 und 6 zeigen beispielhaft experimentelle Ergebnisse, mit denen die phononenverstärkte Nahfeldresonanz bestätigt wird. Im linken Teil von Fig. 5 ist ein Ausschnitt einer teilweise mit Gold beschichteten SiC-Oberfläche gezeigt. Die Größe der abgebildeten Probe beträgt  $1.6 \cdot 2.3 \mu\text{m}^2$ . Die Dicke der Au-Schicht beträgt 10 nm. Die rechteckigen Markierungen zeigen die SiC-Bereiche, in denen die Ergebnisse gemäß Fig. 6 aufgenommen wurden. Die beschichtete SiC-Oberfläche wurde als Probe in einem zur Durchführung der erfindungsgemäßen Messung modifizierten Atomkraftmikroskop (AFM) angeordnet. Als Sonde wurde eine Pt-beschichtete Cantilever-Tastspitze mit einem Spitzenumfang von ungefähr 20 nm verwendet. Zur Aufnahme des Topographiebildes (Fig. 5a) wurde die Messanordnung im AFM-Modus betrieben, d. h. die Topographie der Goldbeschichtung wurde durch herkömmliche Atomkraftmikroskopie erfasst.

Gleichzeitig wurde die Tastspitze (Sonde) fokussiert mit einem abstimmbaren CO<sub>2</sub>-Laser oder Quantenkaskadenlaser im infraroten Spektralbereich bestrahlt. Das rückgestreute Licht wurde interferometrisch erfasst (siehe unten Fig. 2, und DE 100 35 134). Durch Detektion der rückgestreuten Amplitude  $s = |\alpha_{\text{eff}}|$  wird die lokale Nahfeldwechselwirkung zwischen der Sonde und der Probenoberfläche direkt erfasst. Die Messung von  $s$  erfolgt ortsaufgelöst, indem der interessierende Bereich der Oberfläche schrittweise abgetastet (abgescannt) wird.

Die Figuren 5b und 5c illustrieren die ermittelten  $s$ -Werte qualitativ. Je größer der  $s$ -Wert ist, desto heller ist der zugehörige Messort eingezeichnet. Figur 5b zeigt, dass durch die phononenverstärkte Resonanz bei einer Bestrahlung mit 929 cm<sup>-1</sup> das Signal  $s$  stark erhöht ist. Bereits bei einer geringen Veränderung der Beleuchtungswellenlänge auf 978 cm<sup>-1</sup> ergibt sich eine Kontrastumkehrung. Die Verstärkung des Signals  $s$  verschwindet, der SiC-Bereich in Fig. 5b erscheint dunkler.

In Fig. 6 sind quantitative Messergebnisse dargestellt, die an den in Fig. 5a markierten Bereichen gemessen wurden (Mittlung über alle Messwerte in den markierten Bereichen, Messung an getrennten Bereichen, die mit einem Kreis bzw. mit einem Dreieck markiert sind). Die Messergebnisse (Kreise und Dreiecke in Fig. 6) zeigen die Resonanz bei  $929 \text{ cm}^{-1}$ . Die Resonanzverstärkung erreicht relativ zum Messsignal an Au einen Faktor 20. Die gestrichelte Kurve in Fig. 6 basiert auf Simulationsdaten entsprechend dem in Fig. 4a gezeigten Modellsystem. Es zeigt sich eine Abweichung zwischen dem theoretisch berechneten Maximum und den experimentellen Daten, was durch Beschränkungen der in die Modellrechnung eingehenden Näherungen erklärt wird. Für die Messung unter Verwendung von SiC in der Probe oder der Sonde wird entsprechend den Messergebnissen eine Infrarotbestrahlung im Bereich von  $890 \text{ cm}^{-1}$  bis  $940 \text{ cm}^{-1}$  bevorzugt.

#### Erstes Ausführungsbeispiel: Probe-Sonde-Kombinationen für Detektionsanwendungen

Das erfindungsgemäße Verfahren ist allgemein mit Probe-Sonde-Kombinationen umsetzbar, von denen mindestens ein Teil eine polare Festkörperstruktur aufweist. Die Form der Probe und der Sonde wird je nach den konkreten Messanforderungen gewählt, wie dies schematisch in Fig. 1 illustriert ist.

Gemäß Fig. 1a ist die Probe 1 eine ebene oder gekrümmte Festkörperoberfläche, die ggf. ein Adsorbat trägt, und die Sonde 2 eine Tastspitze. Zur Ermittlung der dielektrischen Eigenschaften der Probe 1 ist die Tastspitze 2 in Berührung oder mit Abstand (z. B. bis 100 nm) zur Probe 1 angeordnet. Mindestens eine Komponente enthält ein polares Material. Bei Infrarotbestrahlung werden Phononpolaritonen resonant angeregt, die einen selektiv detektierbaren Streulichtanteil liefern, der in der oben beschriebenen Weise empfindlich von den dielektrischen Eigenschaften der Probe 1 in Umgebung der Sonde 2 abhängig ist.

Gemäß Fig. 1b umfasst die Probe 1 ein Adsorbat auf einer Festkörperoberfläche und die Sonde 2 wiederum z. B. eine Tastspitze. Das Adsorbat 1 wird bspw. durch einzelne Moleküle, Partikel oder ein schichtförmiges Adsorbat gebildet. Das Adsorbat kann auch in die Oberfläche eingebettet oder unter der Oberfläche unter einer Deckschicht angeordnet sein. Die Anordnung unter der Oberfläche kann bspw. bis zu einer Tiefe von 100 nm, vorzugsweise 1 bis 3 nm erfolgen. Bei Infrarotbestrahlung der Sonde 2 wird ein Streulichtanteil generiert, der von den dielektrischen Eigenschaften des Adsorbats 1 abhängig ist. Beim Aufbau gemäß Fig. 1b können die Proben, die Sonde und/oder die Festkörperoberfläche aus einem polaren Material hergestellt sein, das die erfindungsgemäß resonant überhöhte Nahfeldwechselwirkung bewirkt.

Gemäß Fig. 1c kann die Sonde 2 in die Probe 1 aus einem festen, gasförmigen oder flüssigen Material eingebettet sein. Als Sonde 2 sind bspw. eine Vielzahl von suspendierten Partikeln vorgesehen, die bei Infrarotbeleuchtung Infrarotlicht mit dem resonant modifizierten Streulichtanteil streuen. Der interessierende Streulichtanteil ist empfindlich von den dielektrischen Eigenschaften und damit insbesondere von der Zusammensetzung der Probe 1 abhängig.

Die Figuren 1d bis 1f zeigen schematisch verschiedene Gestaltungen der Sonde 2 als AFM-Tastspitze (d), als Lesekopf (e) oder als festphasenadsorbierten oder suspendierten Partikel (f). Mindestens ein Teil der Probe-Sonde-Kombination besitzt charakteristische Querschnittsdimensionen, die so klein gewählt sind, dass die gewünschten Phononpolaritonresonanzen auftreten. Die Dimension ist vorzugsweise kleiner oder etwa gleich der Wellenlänge der verwendeten Infrarotbestrahlung, die im Bereich von z. B. 2  $\mu\text{m}$  bis einige 100  $\mu\text{m}$  liegen kann. Beispielsweise besitzt die Spitze der Tastspitze 2 (Fig. 1a, b) oder ein Par-

tikel 2 (Fig. 1c) eine Dimension im Bereich von 0.1 nm bis 5  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise von 1 nm bis 1000 nm.

Es wird betont, dass die Sonde 2 nicht notwendig die polare Festkörperstruktur besitzen muss. Vielmehr ist bei einer Probe 1 aus einem polaren Material (z. B. Fig. 1a) auch eine nicht-polare Tastspitze 2 verwendbar. Nach dem Prinzip der Spiegelladung wird bei Infrarotbeleuchtung der Tastspitze 2 durch Nahfeldkopplung mit der Probe 1 in dieser ein Spiegeldipol resonant angeregt.

Die Beleuchtung der Probe-Sonde-Kombination mit Infrarotstrahlung erfolgt je nach dem konkreten Anwendungsfall. Es ist bspw. eine Bestrahlung im freien Raum (s. Fig. 2) oder ein Einkopplung über Wellenleiter vorgesehen.

#### Messanordnung zur Nahfeld-Streulichtmessung

Figur 2 zeigt beispielhaft eine Messanordnung zur Streulichtmessung im infraroten Spektralbereich, die eine Beleuchtungseinrichtung 10, eine Sondeneinrichtung 20, eine Probenhalterung 30, eine Detektoreinrichtung 40 und eine Steuereinrichtung 50 umfasst. Die Messanordnung kann im Wesentlichen wie ein herkömmliches AFM aufgebaut sein, so dass hier auf weitere Einzelheiten nicht eingegangen wird. Die Sondeneinrichtung 20 und die Probenhalterung 30 können relativ zueinander in x-, y- und z-Richtung verfahren werden. Die Sondeneinrichtung 20 umfasst eine Cantileverspitze 21 (Tastspitze) mit einer Sonde 2, deren aktueller Schwingungszustand mit einer Laser-Detektorkombination 22 erfasst werden. Die Steuerung der Cantileverspitze 21 kann alternativ mit anderen Detektionsverfahren, wie z. B. piezoelektrische Detektion erfolgen. Die Cantileverspitze 21 mit der Sonde 2 kann in Schwingungen in z-Richtung versetzt werden. Die z-Schwingungsfrequenz trägt bspw. 10 bis 300 kHz. Die Schwingungsamplitude in z-Richtung beträgt bspw.

20 nm. Die Beleuchtungseinrichtung 10 und die Detektoreinrichtung 40 wirken vorzugsweise so zusammen, wie es in DE 100 35 134 beschrieben ist (Demodulationstechnik). Zur Erfassung des Nahfeldanteils erfolgt bspw. eine phasensensitive Lock-in-Messung bei einer Summenfrequenz aus der z-Schwingungsfrequenz der Sonde 2 (oder von deren höheren Harmonischen) und einer in der Beleuchtungseinrichtung synthetisierten Differenzfrequenz, die gegenüber der infraroten Beleuchtungsstrahlung verschoben ist.

Die Messanordnung gemäß Fig. 2 ist insbesondere für die nahfeldoptische Mikroskopie eingerichtet. Bei anderen Anwendungen der Erfindung ist der Aufbau zu modifizieren, wobei in jedem Fall eine Kombination aus Probe 1 und Sonde 2 (beispielsweise Speichermedium und Datenlesekopf) und eine Kombination aus Beleuchtungs- und Detektoreinrichtungen zur Erfassung der resonant erhöhten Nahfeldwechselwirkung zwischen Probe und Sonde vorgesehen sind.

#### Anwendungsbeispiele

##### (a) Optische Nahfeldmikroskopie

Durch die Phononpolariton-resonante Signalverstärkung liefert die Erfindung gegenüber der herkömmlichen Nahfeldmikroskopie eine erhebliche Kontrastverstärkung (siehe Figur 5b). Dies ermöglicht einerseits (insbesondere bei Verwendung einer resonanten Sonde) eine schnellere Datenerfassung und andererseits eine Erweiterung auf Proben mit einer Oberflächenzusammensetzung, die sich durch geringere Unterschiede der Dielektrizitätskonstanten auszeichnet. Es können insbesondere bei Verwendung einer resonanten Probe geringere Brechzahlunterschiede mit höherer Empfindlichkeit unterschieden werden. Dies spielt bei Anwendungen der Nahfeldmikroskopie in der Biochemie, z. B. bei der Unterscheidung von Proteinen und Lipiden eine Rolle.

Durch die interferometrische Messung des Nahfeldanteils (Demodulationstechnik) und Auswertung höherer Harmonischer der z-Schwingungsfrequenz der Sonde kann die Ortsauflösung weit unter den Sondenradius verbessert werden.

(b) Datenspeichertechnik/optisches Lesen gespeicherter Daten

Bei Verwendung polarer Speichermedien ermöglicht die Erfindung ein Auslesen von Bitstrukturen mit charakteristischen Dimensionen von 10 nm. Dies entspricht einer Speicherdichte im Bereich von Tbit/cm<sup>2</sup>. Derartige Bitstrukturen können in kristallinen Materialien (z. B. SiC) durch Ionenbestrahlung (lokale Umwandlung in nicht-kristalline oder amorphe Strukturen) geschrieben werden.

Bei Verwendung eines polaren Speichermediums können als Sonden Leseköpfe aus einem nicht-polaren (z. B. Metall) oder einem polaren Material vorgesehen sein. Leseköpfe aus polaren Materialien, insbesondere SiC, werden wegen ihrer hohen Haltbarkeit, der hohen Signalamplitude und einem erhöhten Kontrast bevorzugt.

Eine Datenspeichereinrichtung ist im Wesentlichen wie die Messanordnung gemäß Fig. 1 aufgebaut, wobei ggf. die Sondeneinrichtung 20 als Lesekopf (siehe z. B. Fig. 1e) und die Probenhalterung 30 als Träger des Speichermediums modifiziert sind. Die Beleuchtungseinrichtung ist ggf. auf eine feste, an die jeweilige Kombination aus Probe und Sonde angepasste Wellenlänge eingestellt.

Es ist ein überraschendes und vom bisherigen Gang der Entwicklung abweichendes Merkmal der Erfindung, dass Datenspeicher mit einer erhöhten Speicherdichte optisch mit Infrarotlicht ausgelerzen werden, das eine größere Wellenlänge als bisher zum opti-

schen Datenlesen verwendete Lichtquellen (z. B. blaues Licht) besitzt.

(c) Sensorik

Die erfindungsgemäße Streulichtmessung an Probe-Sonde-Kombinationen, von denen mindestens eine Komponente ein polares Material enthält, ermöglicht Anwendungen in der chemischen Sensorik und in der physikalischen Messtechnik. Beispielsweise kann die Anordnung gemäß Fig. 1b zur Detektion von adsorbierten Stoffen 1 auf einer Oberfläche verwendet werden. Alternativ können Stoffe detektiert werden, die in die Oberfläche oder das Volumen eingebettet sind. Da die Nahfeldkopplung empfindlich von den Dielektrizitätskonstanten der beteiligten Objekte abhängig ist, kann aus der Stärke der Resonanzerhöhung auf die beteiligten Stoffe rückgeschlossen werden. Beispielsweise ist die Dielektrizitätskonstante eines Halbleiters von der Dotierung abhängig. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können hochempfindlich Dotierungsverteilungen gemessen werden. Es erfolgt vorzugsweise eine spektral selektive Streulichtmessung oder eine spektrale Analyse des erfassten Streulichts.

Eine weitere Anwendung besteht bei der Bereitstellung von Testproben für die optische Nahfeldmikroskopie. Eine Testprobe umfasst eine glatte Oberfläche (ohne Topographie) mit einem starken optischen Kontrast, z. B. durch Implantation von Fremdstoffen oder Strukturumwandlungen.

In der physikalischen Messtechnik sind des Weiteren Anwendungen in der Temperatur- oder Drucksensorik möglich. Da die Gitterschwingungen in der Probe oder der Sonde empfindlich von den Umgebungsbedingungen abhängig sind, wirken sich diese auch auf die Nahfeldkopplung aus. So können auch Temperatur- oder Druckwerte im Inneren von flüssigen oder festen Proben erfasst werden.

In der chemischen Sensorik können Nanostrukturen mit hoher Ortsauflösung chemisch analysiert werden. Die Erfindung ermöglicht auch lokale Strukturanalysen an Kristallen oder die Analyse von Phasenumwandlungen (z. B. bei einer Biomineralisation).

In der chemischen Sensorik können Proben auch mit hoher spektraler (oder stofflicher) Selektivität analysiert werden. Wenn eine Probe beispielsweise durch ein Kompositmaterial gebildet wird, in dem sich die Komponenten durch geringfügige chemische Modifizierungen unterscheiden, so würde die herkömmliche Infrarotspektroskopie nur stark überlappende, breite Resonanzen ergeben. Erfindungsgemäß wird durch die Nahfeldwechselwirkung jedoch ein sogenanntes "spectral narrowing" erzielt. Die für die Komponenten spezifischen Resonanzen würden sich nicht mehr überlappen und wären daher sicher unterscheidbar. Entsprechend lassen sich beispielsweise auch das Fortschreiten von Phasenänderungen oder chemischen Reaktionen in Festkörpern oder Adsorbaten verfolgen.

Ein Beispiel für ein erfindungsgemäß untersuchtes Kompositmaterial ist eine Zusammensetzung aus Kalziumphosphat und Kalziumhydrogenphosphat, die als Biominerale z. B. für Implantationszwecke von Interesse sind. Mit der erfindungsgemäßen Streulichtmessung kann der Mineralisationsgrad einer Zusammensetzung auch in kleinsten Probenvolumen erfasst werden.

#### (d) Weitere Anwendungen

Weitere Anwendungen der Erfindung bestehen in der Untersuchung nicht-linearer optischer Erscheinungen, die durch die Bereitstellung hoher Feldstärken in der Nähe eines stark gekrümmten polaren Festkörpers möglich werden (Nanofokussierung).

## 2. Ausführungsbeispiel: Resonante Weiterleitung von Phonon-Polaritonen

Das erfindungsgemäße Verfahren ist auch bei der optischen Datenverarbeitung und beim Aufbau optischer Schaltkreise anwendbar, wie im Folgenden unter Bezug auf die Figuren 7 und 8 erläutert wird. Gemäß Fig. 7 umfasst eine Grundform eines optischen Schalters 60 ein Substrat 61, auf dem mindestens zwei Objekte 1, 2 angeordnet sind. Die Objekte 1, 2 sind Nanopartikel von denen mindestens eines aus dem oben charakterisierten polaren Material besteht. Der Abstand der Objekte 1, 2 beträgt bspw. 100 nm. Das Substrat 61 besteht bspw. aus Silizium. Mit einer Beleuchtungseinrichtung 10 wird die Objekt-Kombination 1, 2 mit infrarotem Licht beleuchtet. Der durch die Nahfeldkopplung modifizierte Anteil des Streulichts wird mit der Detektoreinrichtung 40 (z. B.: Halbleiterdiode) detektiert.

Durch Modulierung der physikalischen Eigenschaften bspw. des Objekts 1 kann die Ausbildung der Nahfeldresonanz zwischen den beiden Objekten 1, 2 ein- oder ausgeschaltet werden. Die Modulierung umfasst bspw. bei einem ferroelektrischen Partikel 1 ein elektrisches Umschalten mit einem Modulator 70 (modulierbare elektrische Spannungsquelle). Die elektrische Modulation wird entsprechend dem mit der Detektoreinrichtung 40 gemessenen Licht aufgeprägt und in einer Datenverarbeitungseinrichtung 80 ausgewertet.

Während Fig. 7 die Grundform einer optischen Schalteinrichtung durch Modulation von Infrarotlicht illustriert, zeigt der schematisch illustrierte optische Modulator gemäß Fig. 8 einen Ausschnitt aus einem Netzwerk mit einer Vielzahl partikelförmiger Objekte 1 bis 7. Analog zu den oben erläuterten Prinzipien sind bspw. die Objekte 3 und 6 mit externen Feldern modulierbar. Je nach Einstellung der Partikeleigenschaften, so dass eine rezonante Ankopplung mit den benachbarten Objekten (siehe ovale

Markierungen) erfolgen kann oder nicht, kann ein ursprünglich gemäß Pfeil A eingekoppelter Anregungszustand auf keinem, einem oder beiden Zweigen B, C weitergeleitet werden. Der optische Modulator gemäß Fig. 8 kann ferner mit mindestens einer Beleuchtungseinrichtung und/oder mindestens einer Detektoreinrichtung ausgestattet sein (s. Fig. 7).

Das Umschalten von Objekten in der Kette optischer Bauteile kann auch durch eine Beeinflussung der Umgebung des jeweiligen Objekts (z. B. des Substrats oder des angrenzenden Halbraumes) erfolgen. Anstelle eines Modulators (z. B. 70) kann ein externer Modulator auch eine zusätzliche Bestrahlungseinrichtung umfassen. Die Variation der physikalischen Eigenschaften von mindestens einem Objekt erfolgt dann durch Lichtbestrahlung.

Die in der vorliegenden Beschreibung in Bezug auf die ersten und zweiten Ausführungsformen der Erfindung beschriebenen Einzelheiten können auch in Kombination realisiert sein. Beispielsweise können die oben beschriebenen Tastspitzen auch bei einem optischen Modulator gemäß den Figuren 7 oder 8 als Beleuchtungseinrichtung oder als Detektoreinrichtung zur Auskoppelung von Anregungszuständen vorgesehen sein.

15717 Hz/hr

## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Erfassung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen im infraroten Spektralbereich, mit den Schritten:

- Beleuchtung einer Objekt-Kombination aus mindestens zwei Objekten (1-7) mit Infrarotstrahlung, so dass eine Infrarot-Nahfeldkopplung zwischen den Objekten (1-7) erzeugt wird, und
- Erfassung des von der Objekt-Kombination gestreuten Streulichts, das einen Anteils (s) enthält, der durch die Nahfeldkopplung modifiziert ist,  
dadurch gekennzeichnet, dass
  - mindestens eines der Objekte (1-7) ein polares Material umfasst, das zumindest teilweise eine polare Festkörperstruktur besitzt, und
  - bei der Beleuchtung in dem mindestens einen der Objekte (1-7) mit dem polaren Material mindestens eine Phönonresonanz angeregt wird, mit der der modifizierte Anteil (s) des Streulichts verstärkt wird.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem die Erfassung des modifizierten Anteils (s) eine Infrarotdetektion mit einer Detektoreinrichtung (40) umfasst.

3. Verfahren gemäß Anspruch 2, bei dem eines der Objekte, das eine Probe (1) bildet, eine Festkörperoberfläche, ein Adsorbat auf einer Festkörperoberfläche oder ein festes, flüssiges oder gasförmiges Volumenmaterial umfasst.

4. Verfahren gemäß Anspruch 2 oder 3, bei dem eines der Objekte, das eine Sonde (2) bildet, eine Tastspitze eines Nahfeldmikroskops, einen Lesekopf oder mindestens ein in einem festen, gasförmigen oder flüssigen Material eingebettetes oder suspendiertes Partikel umfasst.

5. Verfahren gemäß Anspruch 4, bei dem zur optischen Nahfeldmikroskopie die Sonde (2) und eine Probe (1), die untersucht werden soll und das zugehörige zweite Objekt der Objekt-Kombination bildet, schrittweise relativ zueinander bewegt werden und eine ortsaufgelöste Detektion des modifizierten Anteils (s) erfolgt.
6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 4 oder 5, bei dem zur optischen Nahfeldmikroskopie die Beleuchtung der Objekt-Kombination mit Infrarotstrahlung mit verschiedenen Wellenlängen erfolgt, wobei jeweils eine spektral spezifische Streulichtdetektion erfolgt.
7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 4 bis 6, bei dem der durch die Nahfeldkopplung modifizierte Anteil des gemessenen Streulichts einer Spektralanalyse unterzogen wird.
8. Verfahren gemäß Anspruch 4, bei dem zum Auslesen optisch gespeicherter Daten die Sonde (2) als Lesekopf über einen Datenträger, der das zugehörige zweite Objekt der Objekt-Kombination bildet, verfahren wird und eine Detektion einer Datenstruktur erfolgt, die auf der Oberfläche des Datenträgers aufgebracht, in die Oberfläche des Datenträgers eingeprägt oder unter der Oberfläche des Datenträgers angeordnet ist.
9. Verfahren gemäß Anspruch 5 oder 8, bei dem die Probe (1) oder der Datenträger eine topographiefreie Oberfläche besitzt, die Strukturen mit Brechzahlunterschieden und charakteristischen Dimensionen aufweist, die kleiner als 10 µm sind.
10. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem die Erfassung des modifizierten Anteils (s) eine rezonante Anregung mindestens eines benachbarten Objektes (1-7) aus einem polaren Material umfasst.

11. Verfahren gemäß Anspruch 10, bei dem mit der Erfassung des modifizierten Anteils (s) mindestens eine Reihe aus einer Vielzahl von Objekten (1-7) aus einem polaren Material resonant angeregt wird.
12. Verfahren gemäß Anspruch 11, bei dem mit der Erfassung des modifizierten Anteils (s) mehrere Reihen von Objekten (1-7) aus einem polaren Material resonant angeregt werden können, die über mindestens eine Verzweigung miteinander verbunden sind.
13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 10 bis 12, bei dem physikalische Eigenschaften, insbesondere Kristallstruktur, Bandstruktur oder Ladungsträgerdichte, von mindestens einem Objekt oder von einer Umgebung mindestens eines Objektes mit elektromagnetischen, elektrischen oder magnetischen Feldern moduliert wird, so dass die dielektrischen Eigenschaften des Objektes verändert und der modifizierte Anteil (s) des am Objekt gestreuten Streulichts entsprechend moduliert werden.
14. Verfahren gemäß Anspruch 13, bei dem die physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Objektes oder von dessen Umgebung mit hochfrequenten oder niederfrequenten elektromagnetischen Feldern modifiziert werden.
15. Verfahren gemäß Anspruch 12 und 13, bei dem die physikalischen Eigenschaften eines Objektes modifiziert werden, das an einer Verzweigung angeordnet ist.
16. Verfahren gemäß Anspruch 13, bei dem die Modulation des modifizierten Anteils (s) des Streulichts detektiert und als optisches Schaltsignal oder zur Nahfeldbeleuchtung weiterer Objekt-Kombinationen verwendet wird.

17. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das polare Material einen III-V-, IV-IV- oder II-VI-Halbleiter umfasst.

18. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das polare Material ein ferroelektrisches Material (z.B. Bariumtitanat), SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{CaPO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  oder  $\text{SiO}_2$  umfasst.

19. Verfahren zur infrarotspektroskopischen Untersuchung einer Probe, die aus mehreren Komponenten oder Phasen besteht, bei dem die Probe einer Streulichtdetektion mit einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 7, 17 oder 18 unterzogen wird und die Komponenten oder Phasen in Abhängigkeit vom Auftreten spezifischer Phononresonanzen erfasst oder analysiert werden.

20. Messanordnung zur Streulichtmessung im infraroten Spektralbereich, die umfasst:

- eine Beleuchtungseinrichtung (10) zur Erzeugung einer Infrarotstrahlung,
- eine Sondeneinrichtung (20), die mit Abstand von einer Probe (1) verfahrbar oder in einer Probe (1) angeordnet ist, und
- eine Detektoreinrichtung (30), mit der die an der Sondeneinrichtung (20) gestreute Infrarotstrahlung detektierbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass
- die Sondeneinrichtung (20) mindestens eine Sonde (2) umfasst, die zumindest teilweise aus einem Material besteht, das eine polare Festkörperstruktur besitzt.

21. Messanordnung gemäß Anspruch 20, bei der die Sonde (2) einen III-V-, IV-IV- oder II-VI-Halbleiter enthält.

22. Messanordnung gemäß Anspruch 20, bei der die Sonde (2) aus einem ferroelektrischen Material (z.B. Bariumtitanat), SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{CaPO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  oder  $\text{SiO}_2$  besteht.

23. Messanordnung gemäß einem der Ansprüche 20 bis 22, die als optisches Nahfeldmikroskop mit einer Tastspitze (21), die die Sonde (2) trägt, und einer Laser-Detektor-Kombination (22) zur Steuerung der Position der Tastspitze (21) aufgebaut ist.

24. Messanordnung gemäß einem der Ansprüche 20 bis 22, die als Leseeinrichtung für einen optischen Datenspeicher aufgebaut ist.

25. Messanordnung gemäß einem der Ansprüche 20 bis 22, die als chemische oder physikalische Sensoreinrichtung aufgebaut ist.

26. Optischer Modulator (60) zur Erfassung oder Verarbeitung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen im infraroten Spektralbereich, der umfasst:

- mindestens zwei Objekte (1-7), die auf einem Substrat (61) angeordnet sind, und
- eine Beleuchtungseinrichtung (10) zur Beleuchtung der Objekte (1-7) mit einer Infrarotstrahlung, wobei
- die Objekte (1-7) einen derart geringen Abstand besitzen, dass durch die Beleuchtung eine Infrarot-Nahfeldkopplung zwischen den Objekten erzeugt wird,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
- mindestens eines der Objekte (1-7) zumindest teilweise aus einem Material besteht, das eine polare Festkörperstruktur besitzt, und
- mindestens eines der Objekte (1, 2, 6) mit einer Modulator-einrichtung (70) zur Modulation von physikalischen Eigenschaften, insbesondere Kristallstruktur, Bandstruktur oder Ladungsträgerdichte, des mindestens einen Objektes oder einer Umgebung des mindestens einen Objektes mit elektromagnetischen, elektrischen oder magnetischen Feldern verbunden ist.

27. Optischer Modulator gemäß Anspruch 26, der mit mindestens einer Detektoreinrichtung (40) ausgestattet ist, mit der die an

den Objekten (1-7) gestreute Infrarotstrahlung detektierbar ist,

28. Optischer Modulator gemäß einem der Ansprüche 26 oder 27, bei dem mindestens eine Reihe aus einer Vielzahl von Objekten (1-7) aus einem polaren Material vorgesehen ist, die bei Beleuchtung mindestens einer Kombination von zwei benachbarten Objekten gegenseitig resonant anregbar sind.

29. Optischer Modulator gemäß Anspruch 28, bei dem mehrere Reihe von Objekten (1-7) vorgesehen sind, die über mindestens eine Verzweigung miteinander verbunden sind.

30. Optischer Modulator gemäß einem der Ansprüche 26 bis 29, bei dem die Objekte aus einem III-V-, IV-IV- oder II-VI-Halbleiter bestehen.

31. Optischer Modulator gemäß einem der Ansprüche 26 bis 30, bei dem die Objekte aus einem ferroelektrischen Material (z.B. Bariumtitanat), SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{CaPO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  oder  $\text{SiO}_2$  bestehen.

32. Optischer Modulator gemäß einem der Ansprüche 26 bis 31, der eine optische Schalteinrichtung bildet.

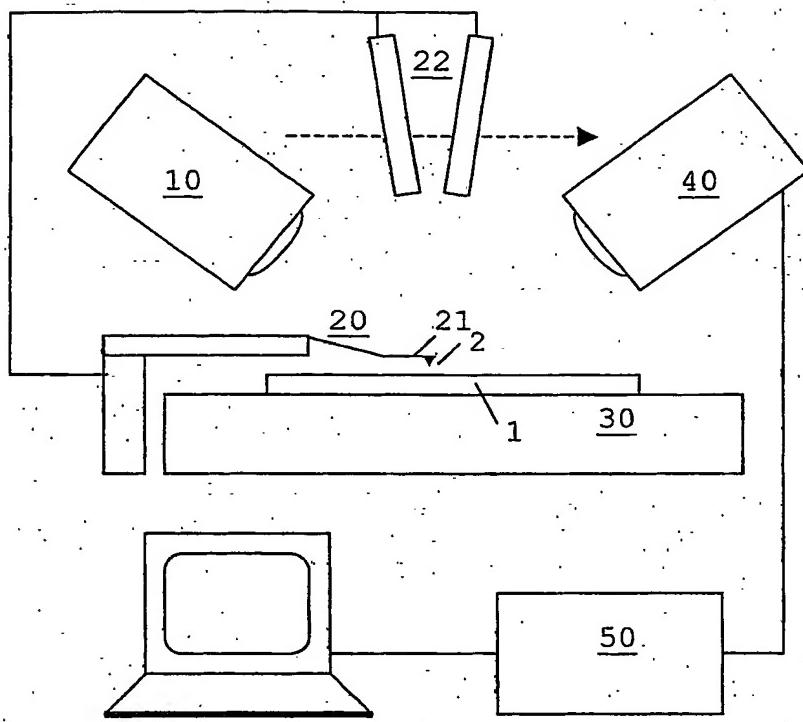
33. Optischer Modulator gemäß einem der Ansprüche 26 bis 32, bei dem die Beleuchtungseinrichtung (10) und/oder die Detektoreinrichtung (40) auf dem Substrat angeordnet ist.

15717 Hz/hr

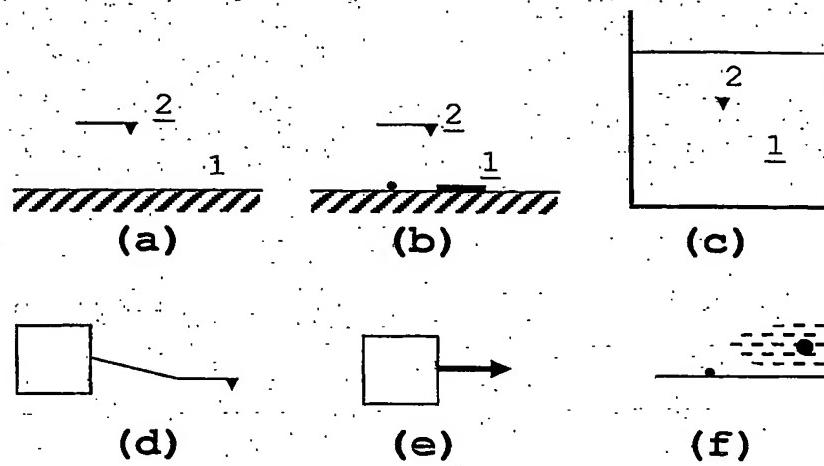
### Zusammenfassung

Es werden Verfahren zur Erfassung von optischen Nahfeldwechselwirkungssignalen im infraroten Spektralbereich beschrieben, mit den Schritten: Beleuchtung einer Objekt-Kombination aus mindestens zwei Objekten (1, 2) mit Infrarotstrahlung, so dass eine Infrarot-Nahfeldkopplung zwischen den Objekten (1, 2) erzeugt wird, und Erfassung des von der Objekt-Kombination gestreuten Streulichts, das einen Anteils (s) enthält, der durch die Nahfeldkopplung modifiziert ist, wobei mindestens eines der Objekte (1, 2) ein polares Material umfasst, das zumindest teilweise eine polare Festkörperstruktur besitzt, und bei der Beleuchtung in dem mindestens einen der Objekte (1, 2) mit dem polaren Material mindestens eine Phononresonanz angeregt wird, mit der der modifizierte Anteil (s) des Streulichts verstärkt wird. Es werden auch Anwendungen des Verfahrens in der Messtechnik, Datenspeichertechnik und in der optischen Signalverarbeitung beschrieben.

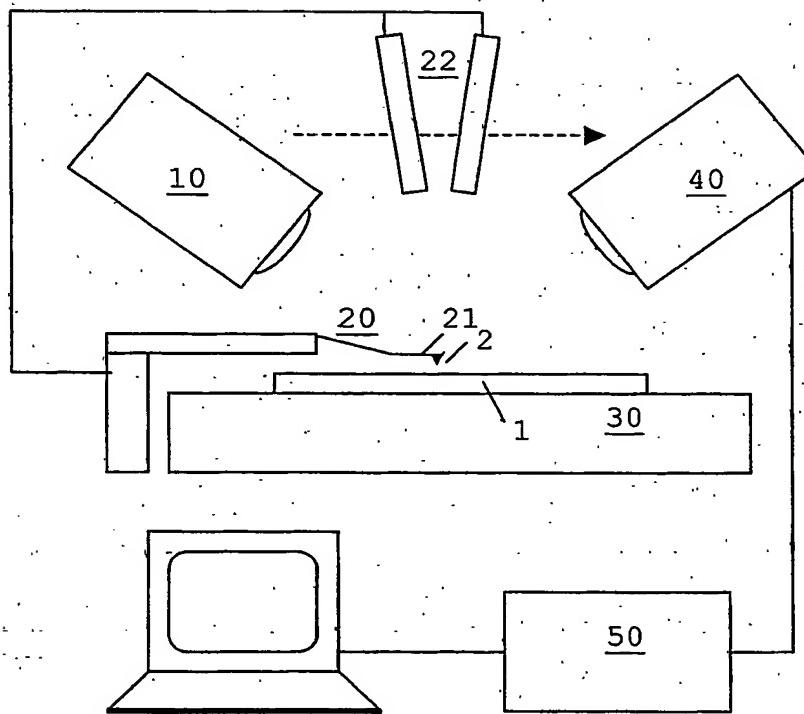
(Fig. 2)



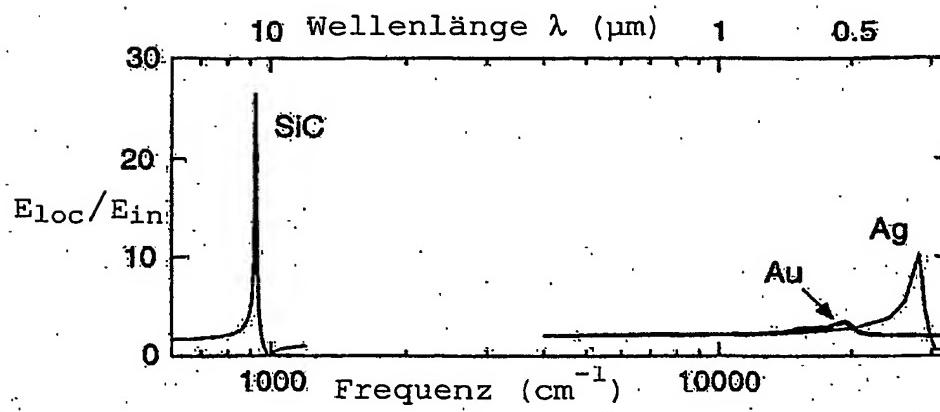
BEST AVAILABLE COPY



**Figur 1**

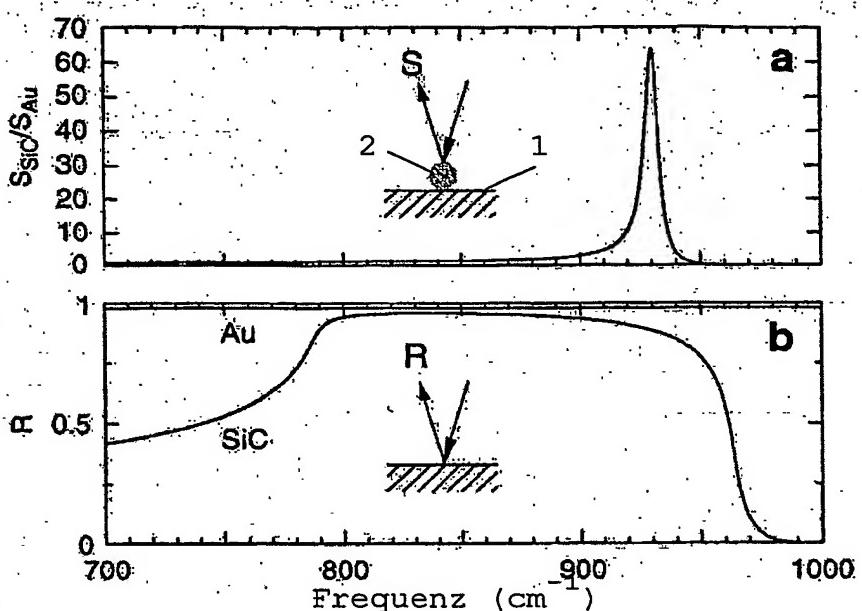


**Figur 2**

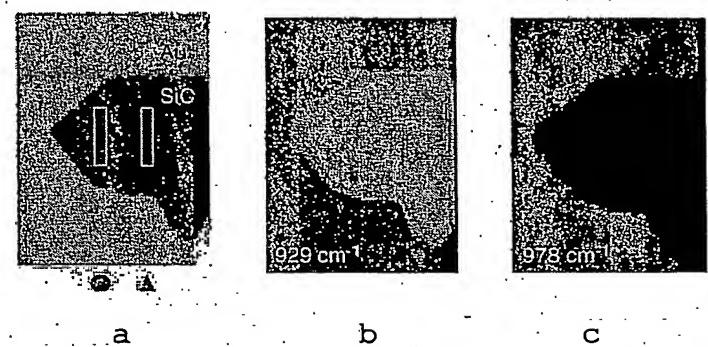


**Figur 3**

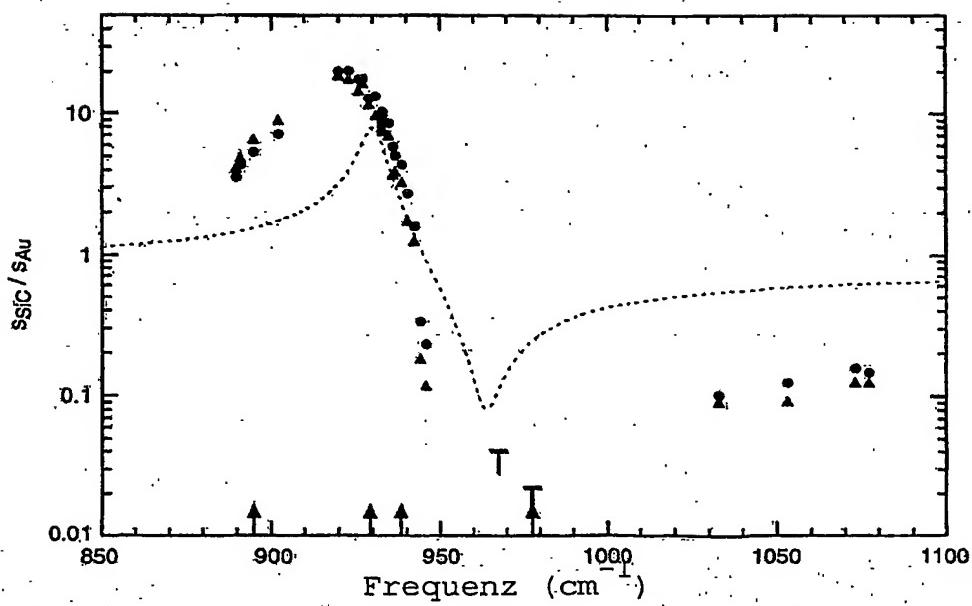
BEST AVAILABLE COPY



Figur 4

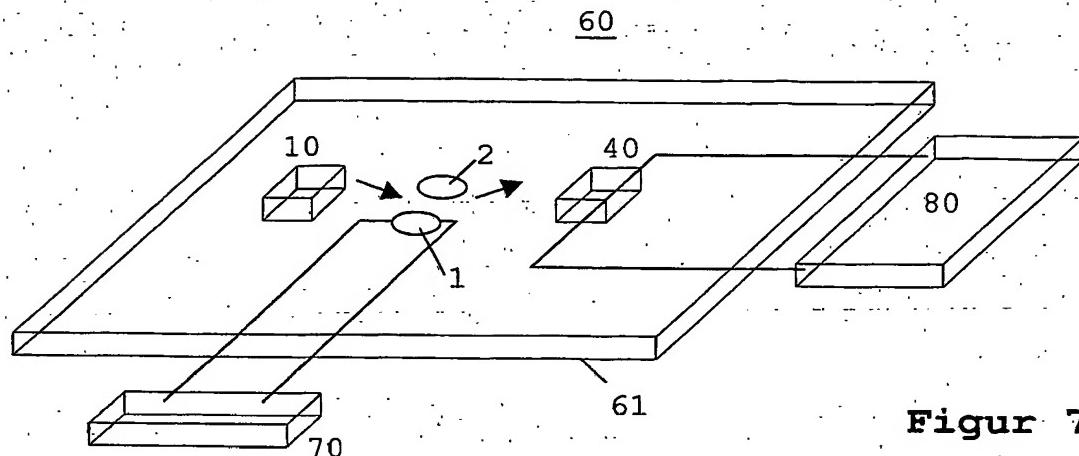


Figur 5

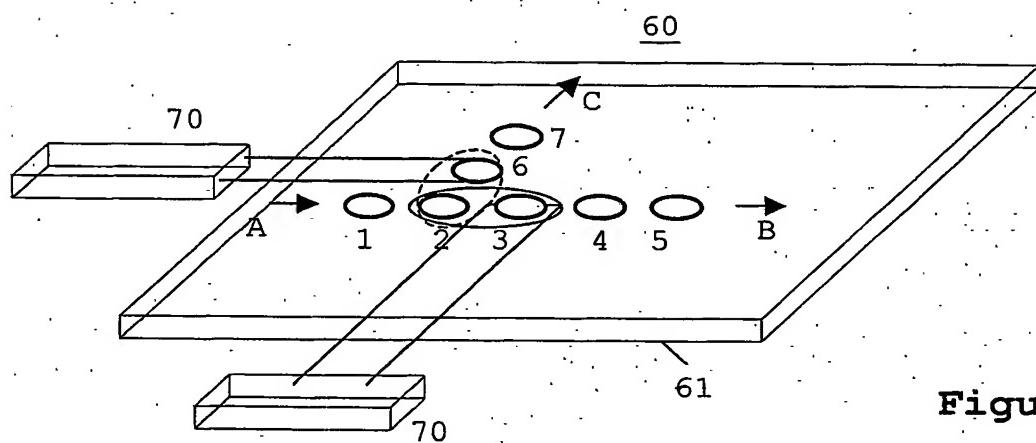


Figur 6

BEST AVAILABLE COPY



Figur 7



Figur 8

BEST AVAILABLE COPY